

Análisis de la destilación criogénica del aire con apoyo de la simulación de procesos

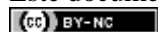
Analysis of cryogenic distillation of air supported by process simulation

Lázaro Jesús Magaña Martel^{1,*}, Ofelia Alfonso Alemán¹

¹Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas (CIIQ), Calle Vía Blanca s/n entre Infanta y Palatino, Cerro. La Habana, Cuba.

*Autor de correspondencia: lmaganam@ciiq.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 2 septiembre 2020 **Aceptado:** 7 septiembre 2020 **Publicado:** 18 septiembre 2020

Resumen

La industria de producción de gases industriales a partir del aire es una actividad de enorme importancia económica y social. El fraccionamiento o destilación del aire es el proceso donde se obtienen diferentes gases como el nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂) y argón (Ar) a temperaturas criogénicas. El proceso más sencillo de esta tecnología es el Linde o doble columna de destilación, siendo este el equipo más importante en este tipo de plantas. Es por eso la necesidad de que los técnicos puedan evaluar el comportamiento real de las columnas para poder detectar dónde se encuentran las mayores dificultades y a su vez conocer la influencia que puede tener la variación de una o más variables de operación sobre el sistema. En este trabajo se presenta el análisis del proceso de fraccionamiento de aire de la empresa OxiCuba S.A., para lo cual se determinaron los principales parámetros de la operación de separación, así como los balances de masa y energía y el funcionamiento hidrodinámico de la destilación, analizando criterios como: carga al rebasadero, caída de presión por plato, inundación y acumulación en el bajante. Para ello se empleó la simulación de procesos como herramienta de apoyo para la obtención de los resultados.

Palabras clave: destilación criogénica, aire, variables, columnas

Abstract

The production of industrial gases from air is an industrial activity of enormous economic and social importance. Fractionation or distillation of air is the process where different gases such as Nitrogen (N₂), Oxygen (O₂) and Argon (Ar) obtained at cryogenic temperatures. The simplest process of this technology is the Linde or double distillation column, being the most important equipment in this type of plant. It is a need for technicians to evaluate the real behavior of the columns to be able to detect where the greatest difficulties are and in turn to know the influence that the variation of one or more operating conditions may have on the system. This work presents the analysis of the air fractionation process of the company OxiCuba S.A., for which the main parameters of the separation operation were determined, as well as the mass and energy balances and the hydrodynamic operation of the distillation, analyzing criteria such as: overflow load, pressure drop per plate, flooding and accumulation in the downspout. For this, process simulation was used as a support tool to obtain the results.

Keywords: cryogenic distillation, air, variables, columns

1. Introducción

La industria de producción de gases industriales (oxígeno, nitrógeno, argón, etc.) a partir del aire es una actividad de enorme importancia económica. El aire es una mezcla de gases formada mayoritariamente por nitrógeno y oxígeno. También contiene pequeñas cantidades de argón, trazas de otros gases (CO_2 , Ne, He) y una cantidad variable de vapor de agua, que depende de la humedad relativa que contenga el mismo [1-3]. Debido a la diferencia de puntos de ebullición existentes entre los componentes mayoritarios del aire O_2 (-183°C), N_2 (-196°C), Ar (-183°C) y la no presencia de formación de puntos azeotrópicos, estos componentes pueden ser separados por destilación fraccionada. Aunque hoy día se emplean distintas tecnologías para separar el aire en sus componentes, las grandes plantas comerciales siguen utilizando el proceso tradicional de fraccionamiento por destilación criogénica. La separación industrial del aire a escala industrial utiliza el sistema de doble columna Linde, que consiste en dos columnas en una, cada una trabajando a diferentes presiones. Estas dos columnas se encuentran conectadas a través de un condensador-rehervidor: el rehervidor de la columna superior actúa como condensador de la columna inferior [1-5].

Debido a la importancia que tienen las columnas de destilación criogénica en Unidades de Separación de Aire, varios autores han realizado diferentes trabajos relacionados con el comportamiento de estos equipos. Wanget et al. [6] implementaron un modelo de no equilibrio para investigar el proceso de destilación criogénica en una columna de empaque estructurado de una unidad de separación de aire donde obtuvieron un modelo confiable de transferencia de calor y masa para el diseño y el cálculo del proceso de destilación, donde se evidencia la viabilidad de dichos modelos.

Cheng et al. [7] evaluaron la posibilidad de implementar una unidad de separación de aire criogénica con una columna de re-compresión de vapor y el uso de la energía criogénica de Gas Natural Licuado, estudiando tres tipos de columna de rectificación criogénica para separación de aire, y sus características termodinámicas mediante la aplicación de la primera y segunda ley de la Termodinámica. Los resultados muestran que la pureza y la relación de recuperación del producto están determinadas por la cantidad total de trabajo térmico y el esquema de distribución de calor. En comparación con la columna de doble rectificación convencional y la columna de destilación internamente integrada con calor, se propone que una columna de re-compresión de vapor es la columna más adecuada para la unidad de separación de aire con el uso de energía criogénica de Gas Natural Licuado, como su menor demanda de trabajo en el eje y la energía mínima de separación.

Leiva et al [8] simulaban una unidad de separación de aire utilizando Aspen Hysys. La simulación y el modelo obtenido fueron validados con los datos operativos de la planta estudiada. La planta se dividió en subsistemas para realizar las simulaciones. Cada subsistema fue validado por separado y luego integrado en una sola simulación. Este tipo de simulador es ampliamente utilizado en simulación de aplicaciones industriales afines a la Ingeniería Química [9-10].

Cuba cuenta con una única planta de producción continua de oxígeno, nitrógeno y argón líquidos, cuyo cliente principal es la Empresa de Gases Industriales. Las columnas de destilación criogénica existentes C1 y C2 están instaladas en estructuras de acero, recubiertas con planchas, que forman cajas herméticas. Estos equipos tienen ya varios años de explotación y debido a la importancia que tienen los mismos, surge la necesidad de que los técnicos puedan evaluar el comportamiento real de las columnas para poder detectar donde se encuentran las mayores dificultades. Además, es importante conocer la influencia que pueden tener la variación de una o más variables de operación sobre el sistema, tanto para dar solución a un problema existente como en el estudio de alternativas operacionales sin tener que variar condiciones de operación en la planta, porque al tratarse de un

proceso de producción continua, estos cambios pueden afectar parámetros de operación y calidad de los mismos provocando pérdidas económicas, además de poner en riesgo la instalación y el personal por algún posible error al implementar estos cambios operacionales.

Por las razones anteriormente descritas, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar las variables de operación importantes y las relaciones entre las mismas, que permitan diagnosticar el sistema en las condiciones reales de operación de la sección de obtención de nitrógeno y oxígeno mediante la destilación criogénica de la planta OxiCuba S.A., con el empleo de la simulación de procesos como herramienta de apoyo.

2. Materiales y Métodos

La representación del proceso de destilación criogénica se realizó con el apoyo de la simulación de procesos como herramienta de análisis de procesos. Si bien los simuladores son útiles y potentes herramientas que permiten realizar modificaciones o rediseños rápidos del modelo de una planta, con vistas a optimizar la rentabilidad económica, necesitan complementarse con programadores de probada experiencia en el proceso simulado que garanticen la bondad de los resultados obtenidos en la simulación [8]. Una decisión clave es la selección de un modelo termodinámico para el cálculo de propiedades termodinámicas. Específicamente, se necesita trabajar con un modelo que relacione la presión, temperatura, volumen específico y composición de cada flujo de la planta. Es por ello que se ha seleccionado la ecuación de estado de *Peng-Robinson (PR)* recomendada para el estudio de plantas de separación de aire, empleada ampliamente en simulación [8,12-15]. La ecuación *PR* para componentes puros está definida por:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (1)$$

Donde:

P =Presión (Pa)

R = Constante Universal de los Gases (8,31 J/molK)

V =Volumen (m^3)

a, b =parámetros

En su forma estándar:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha}{V^2+2bV-V^2} \quad (2)$$

Donde:

α =parámetro

Siendo los parámetros:

$$a = 0.45724 \cdot \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (3)$$

Donde:

T_c =Temperatura crítica (K)

P_c =Presión crítica (Pa)

$$b = 0.07780 \cdot \frac{RT_c}{P_c} \quad (4)$$

$$\alpha = [1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.2699\omega^2)(1 - T_r^{0.5})]^2 \quad (5)$$

ω =factor acéntrico

T_r =Temperatura reducida

Para realizar el análisis de la destilación se consideró estado estacionario. Los datos fueron tomados a partir de las condiciones reales de operación de la planta y características de diseño de los equipos involucrados. Las condiciones de entrada de las corrientes involucradas a la columna son mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de las corrientes de entrada

Corrientes	Parámetros		
	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Flujo (Nm ³ /h)
Aire Entrada	-166,3	472,0	18 500,0
De Columna K10	-186,0	140,0	15 900,00
Vapor E40	-174,0	130,0	8 600,00
Condensador E40	-187,0	180,0	2 100,0
Composición (% molar)			
	Nitrógeno	Oxígeno	Argón
Aire Entrada	78,10	20,95	0,95
De Columna K10	0,00	98,00	2,00
Vapor E40	0,36	81,34	18,30
Condensador E40	46,38	51,54	2,08

La Tabla 2 muestra información sobre los equipos involucrados en la operación bajo estudio.

Tabla 2. Características y parámetros operacionales de las columnas de destilación

Equipo	Parámetro
Columna Inferior C1	
Número de platos	28
Tipo de Plato	Perforado
Plato de Alimentación del Aire	1
Presión de Tope (kPa)	590
Presión de Fondo (kPa)	610
Plato de extracción Nitrógeno Gaseoso	28
Plato de extracción Nitrógeno Impuro	26
Columna Superior C2	
Número de platos	38
Tipo de Plato	Perforado
Plato de Alimentación de Columna K10	27
Plato de Alimentación Vapor de E40	19
Plato de Alimentación de Condensador E40	2
Presión de Tope (kPa)	131
Presión de Fondo (kPa)	150
Plato de extracción Gas Lachman	11
Plato de extracción Oxígeno E4	36

La hidráulica de las dos secciones de columnas fue analizada a partir de los criterios de evaluación recomendados por [11] y son mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Criterios recomendados para evaluar la hidrodinámica de las columnas

Criterio	Valor recomendado
Carga al rebasadero (Máx.)	89,40 m ³ /h-m
Caída de presión por plato expresada como altura de líquido (Máx.)	101 mm
Porcentaje de inundación (Máx.)	80%
Acumulación en el bajante (Máx.)	50%

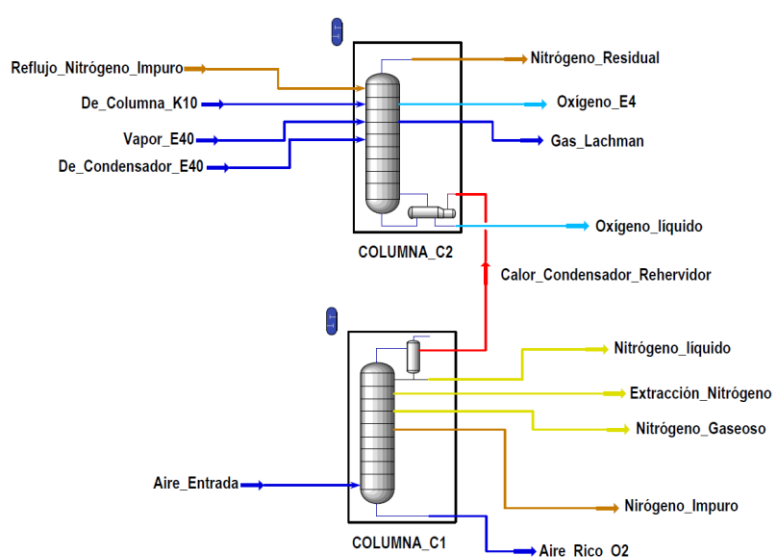
Para obtener estos resultados fueron necesarios los parámetros geométricos de la columna y sus internos mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros geométricos de las columnas

Criterio	Columna inferior	Columna superior
Diámetro (m)	1,20	1,30
Espaciado entre platos (m)	0,60	0,90
Factor de espuma	1,00	1,00
Tipo de plato	Perforado	Perforado
Paso entre agujeros de platos (m)	0,0127	0,0120
Altura del rebasadero (m)	0,0508	0,0290
Tipo de bajante	Vertical	Vertical
Claridad en el bajante (m)	0,0381	0,0350

3. Resultados y Discusión

En la Figura 1 se muestra la representación de la simulación del proceso de destilación criogénica en estado estacionario. Una característica particular de este trabajo es la representación del sistema Condensador-Rehervidor mediante la integración térmica de la columna inferior con la columna superior donde el condensador de la columna inferior cede calor al rehervidor de la columna superior como se muestra en la Figura 2.

**Fig.1 Representación de la destilación criogénica del aire**

Para que funcione una columna doble, el oxígeno líquido debe entrar en ebullición y el nitrógeno gaseoso condensarse. A presión atmosférica esto no sucede puesto que el nitrógeno líquido es más

Diagrama de flujo de un sistema de separación de gases por destilación. Se muestran dos columnas de destilación: la Columna Superior C2 y la Columna Inferior C1.

Columna Superior C2: Platos numerados 1, 2, 11, 19, 27, 36, 38.

Flujos de entrada a la Columna Superior C2:

- Reflujo Nitrógeno Impuro (verde)
- De Condensador E40 (azul)
- Vapor de E40 (azul)
- De Columna Argón Crudo (azul)

Flujos de salida de la Columna Superior C2:

- Nitrógeno Residual (verde)
- Gas Lachman (azul)
- Oxígeno a E4 (azul)

Rehedor: Recibe reflujo de la columna superior y lo envía a la columna inferior.

Condensador: Recibe calor (Calor CONDENSADOR-REHEVIDOR) y produce Nitrógeno Líquido y Reflujo.

Columna Inferior C1: Platos numerados 28, 26, 1.

Flujos de entrada a la Columna Inferior C1:

- Reflujo (verde)
- Aire Entrada (gris)

Flujos de salida de la Columna Inferior C1:

- Nitrógeno Gaseoso (verde)
- Extracción Nitrógeno (verde)
- Extracción Nitrógeno Impuro (verde)
- Aire rico en Oxígeno (azul)

La Tabla 5 muestra los resultados del balance de masa obtenido. Dicha tabla muestra los resultados obtenidos del balance de masa en la columna de fraccionamiento. Como se puede observar la suma de los flujos másicos a la entrada del sistema coinciden con el total de los flujos másicos a la salida cumpliéndose así la ley de conservación de la masa para Sistemas Abiertos en Flujo Estacionario (SAFE). La pureza obtenida de los productos de interés, en este caso nitrógeno y oxígeno líquido es bastante similar a la obtenida en la planta de 99,98% y 99,97% respectivamente. El Gas Lachman es una fracción que se toma de la fase gaseosa en la primera mitad de la columna superior y se envía a la columna de argón crudo que posee la planta. De acuerdo al Manual de Operación de la misma, este gas debe tener una composición de 88-92% de oxígeno, 0,1-0,2% de nitrógeno y 8-11% de argón. Para lograr esto es necesario extraer de la columna una corriente en fase vapor que contenga las composiciones similares a las anteriores. De acuerdo con el perfil de concentraciones mostrado en la Figura 4, esto se obtiene del plato 11 donde se encuentra con concentraciones similares a las anteriores mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Balance de masa en la columna de fraccionamiento

	Flujo (kg/h)	Composición molar (%)		
		N ₂	O ₂	Ar
Entradas				
Aire entrada	23 904,0	78,10	20,95	0,95
De condensador E40	2 823,0	46,38	51,54	2,08
Vapor de E40	12 831,0	0,36	81,34	18,30
De columna K10	22 813,0	0,00	0,98	0,02
Reflujo nitrógeno impuro	9 142,0	99,80	0,08	0,12
Total Entradas	71 513,0	-	-	-
Salidas				
nitrógeno líquido	1 375,0	99,96	0,00	0,04
nitrógeno gaseoso	1 375,0	99,96	0,00	0,04
Extracción nitrógeno	5 001,0	99,93	0,00	0,07
Extracción nitrógeno Imp.	2 627,0	99,79	0,02	0,19
oxígeno líquido	4 001,0	0,00	99,61	0,39
oxígeno a E4	9 742,0	0,00	99,06	0,94
Gas Lachman	23 198,0	0,2	88,26	11,54
nitrógeno residual	10 668,0	98,11	1,47	0,42
Aire rico O ₂	13 526,0	60,36	37,99	1,65
Total Salida	71 513,0	-	-	-
Error en el balance	0,0%			

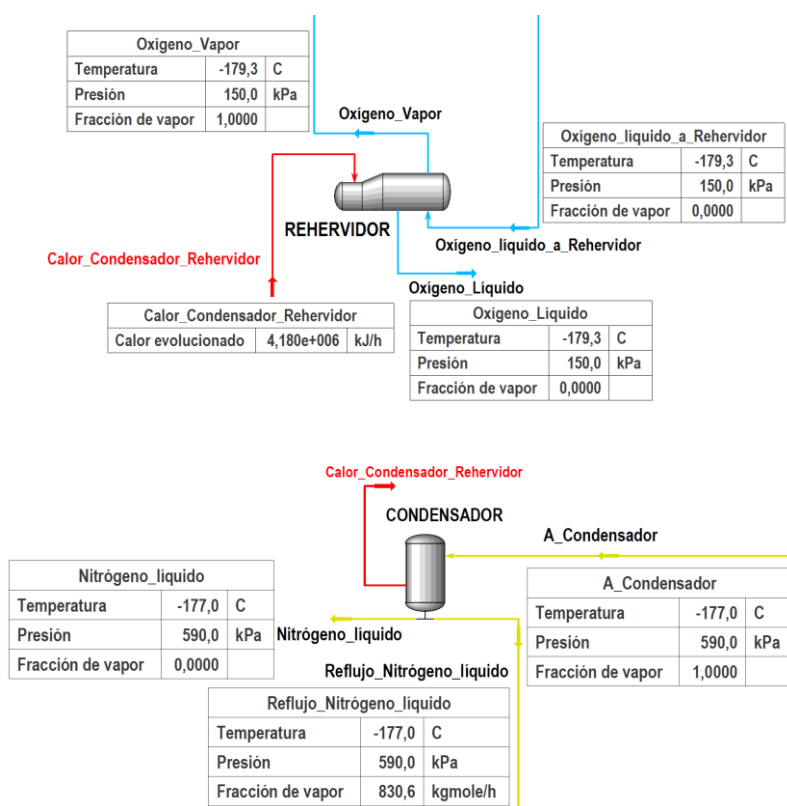


Fig.3 Intercambio de calor Condensador-Rehervidor

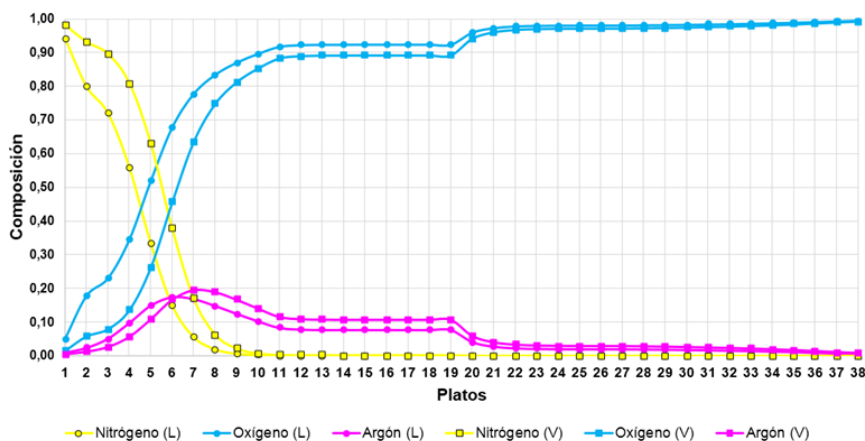


Fig.4 Perfil de concentraciones en la columna superior (platos contados desde el tope)

La Figura 5 muestra el perfil de concentraciones a lo largo de la columna inferior. Aquí se puede ver como se alcanza la pureza de nitrógeno en el tope de la columna (zona de rectificación) donde la concentración de oxígeno es prácticamente nula.

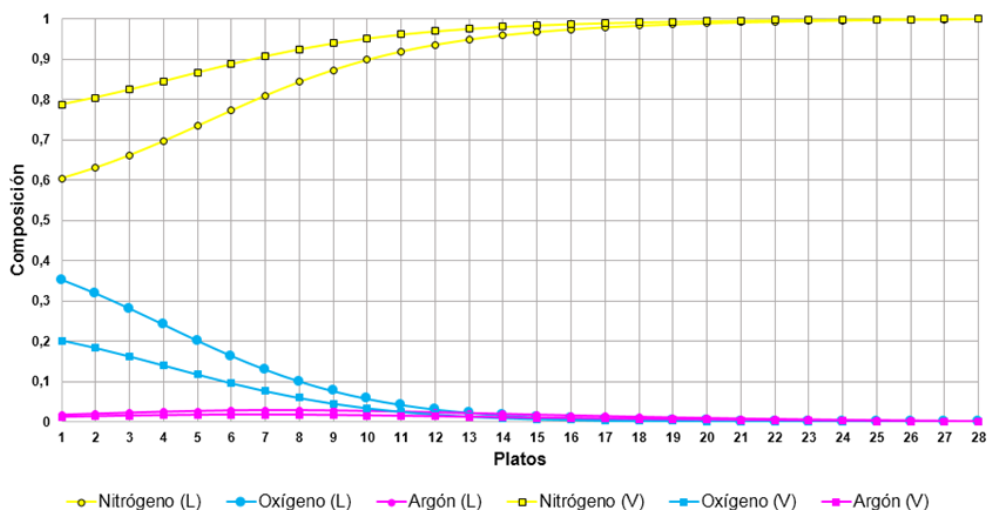


Fig.5 Perfil de concentraciones en la columna superior (platos contados desde el fondo)

Las Figuras 6 y 7 muestran el perfil de temperatura y presión determinados a lo largo de ambas secciones de la columna.

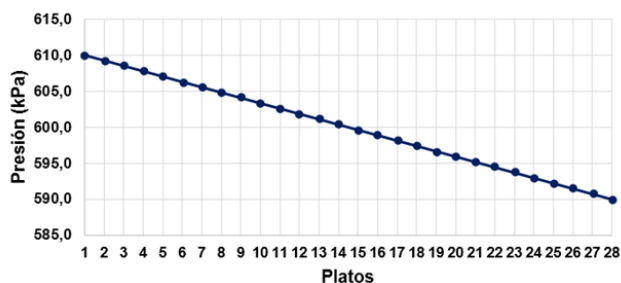
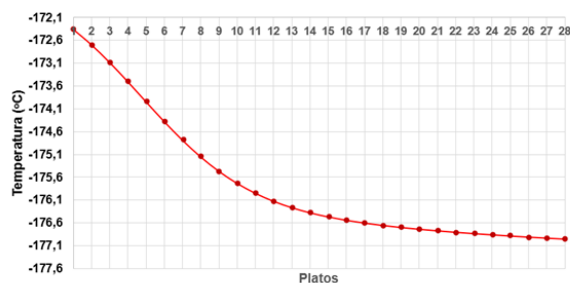


Fig.6 Perfil de temperatura y presión en la columna inferior

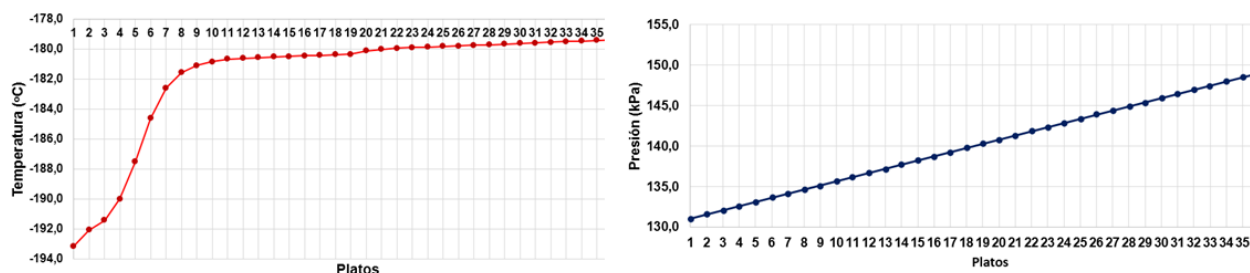


Fig.7 Perfil de temperatura en la columna superior

Se analizó la influencia de la temperatura del aire a la columna de fraccionamiento con el calor evolucionado en el sistema Condensador-Rehervidor, mostrándose los resultados en la Figura 8. La figura muestra que en la medida que disminuye la temperatura de entrada del aire a la columna de fraccionamiento disminuye el calor necesario para llevar a cabo la destilación fraccionada. Esto se debe a que el aire al disminuir su temperatura a la presión de destilación se aproxima a su punto de licuación facilitando así el proceso de separación de sus componentes reduciéndose la energía necesaria para que esto ocurra. Es por eso que la planta alcanza la mejor eficiencia energética en los meses más fríos del año, debido a que se reducen las pérdidas de calor (frío) en el sistema.

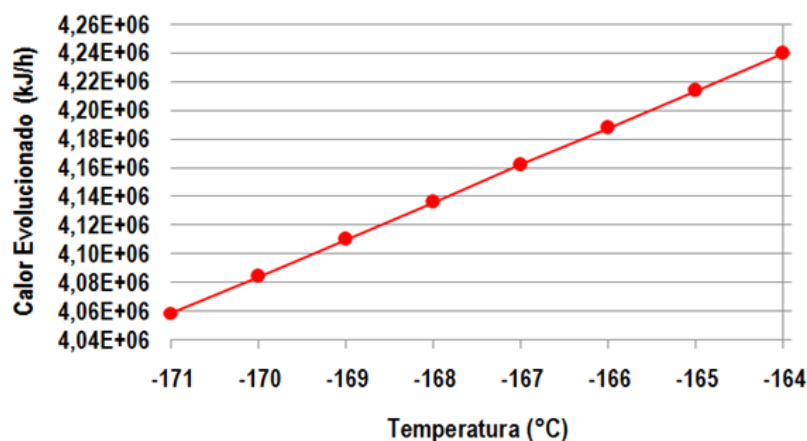


Fig.8 Influencia de la Temperatura de entrada del aire respecto al calor evolucionado en el Condensador-Rehervidor

La hidráulica de las dos secciones de columnas fue analizada a partir de los criterios de evaluación recomendados y los resultados son mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Evaluación de la hidrodinámica de las columnas

Criterio	Valor recomendado	Valor calculado. Columna inferior	Valor calculado. Columna superior
Carga al rebasadero (Máx.)	89,40 m ³ /h-m	30,82 m ³ /h-m	31,48 m ³ /h-m
Caída de presión por plato (Máx.)	101,00 mm	50,94 mm	49,57 mm
Expresada como altura de líquido			
Porcentaje de inundación (Máx.)	80,0%	69,9%	40,53%
Acumulación en el bajante (Máx.)	50,0%	22,92%	14,97%

La Tabla 6 muestra que los criterios calculados se comportan dentro de los valores recomendados. El porcentaje de inundación máximo de las columnas es 69,9% y se alcanza en el plato 28 de la

columna inferior. Este valor, aunque dista un poco del recomendado, es bastante elevado. Es por ello que se estudió la influencia del incremento de flujo de aire de entrada con esta variable. Para ello se tomó como límite superior una capacidad de flujo de aire cercana a la capacidad máxima de operación de la planta. El resultado se muestra en la Figura 9.

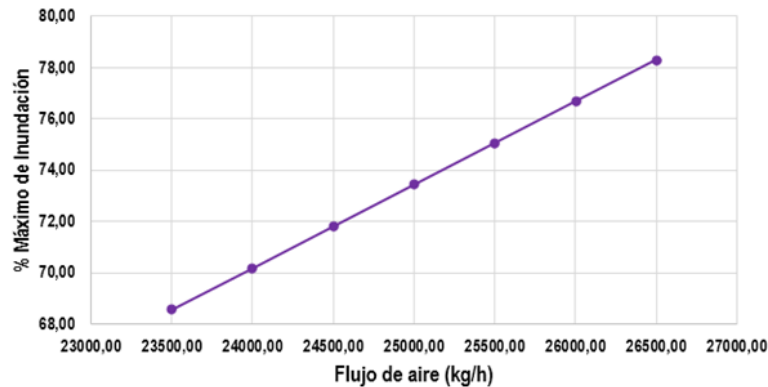


Fig.9 Influencia del flujo de aire con el porcentaje de inundación máximo

Al aumentar el flujo de aire, se sobrecargan fundamentalmente dos sistemas, el condensador como se muestra en la Figura 10 y la hidráulica de la columna. Es por ello que la tendencia del porcentaje máximo de inundación con respecto al incremento del flujo de entrada de aire es a incrementarse y se alcanza en el plato más cercano al condensador. Sin embargo, esta variación no provoca indicios de inundación en la columna por encima del 80%.

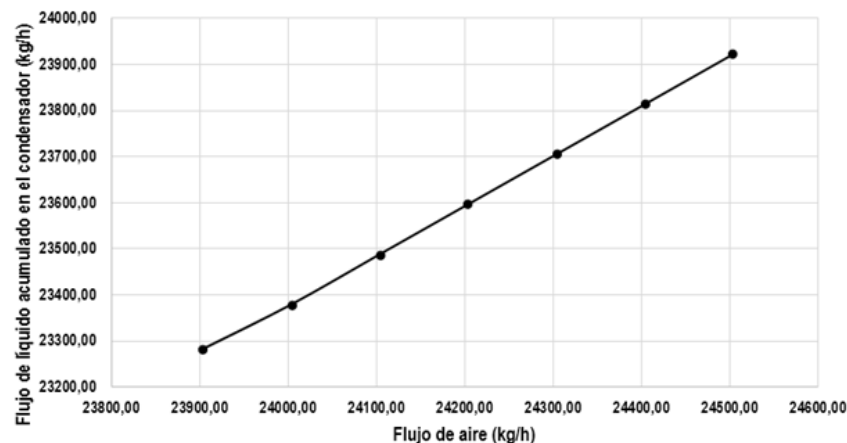


Fig.10 Influencia del flujo de aire con la acumulación de líquido en el condensador

En la Figura 11 se muestran los perfiles de flujo de vapor y líquido a lo largo de las dos columnas de separación.

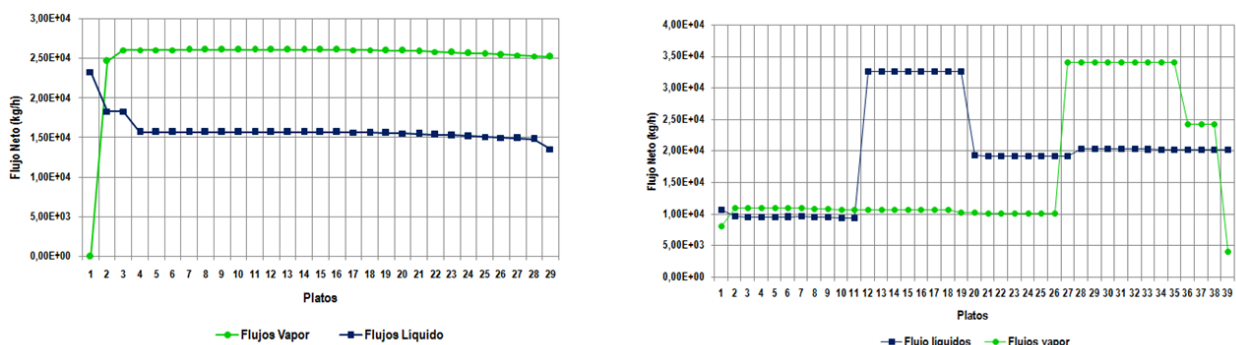


Fig.11 Flujos de vapor y líquido en las columnas

4. Conclusiones

En el presente trabajo se realizó la caracterización del proceso de destilación criogénica para la obtención de gases del aire como el nitrógeno y el oxígeno líquido en la planta OxiCuba S.A., bajo condiciones reales de operación con el apoyo de la simulación de procesos. Se determinaron los principales parámetros de la operación mediante los balances de masa y energía, los flujos y composiciones de las corrientes laterales de salida y los diferentes perfiles de temperatura presión, composición y flujo. Se comprobó el correcto funcionamiento hidrodinámico de la columna de fraccionamiento analizando criterios como: factor de formación de espuma, carga al rebasadero, caída de presión por plato, inundación y acumulación en el bajante. Al aumentar el flujo de aire de entrada al equipo cercano a la capacidad máxima de operación de la planta, se incrementa el porcentaje de inundación máximo a sobrepasar el valor límite.

Referencias

1. Naik L., *A Review on Safety Operation Methods of a Cryogenic Air Separation Unit*. International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences, 2015. **3**: p.96-103.
2. Amin R., et al., *Simulation of N₂ Gas Separation Process from Air*. Journal of Applied Chemistry, 2014. **6**: p.9-13.
3. Magaña, L.J., et al., *Análisis del desempeño de un compresor centrífugo de aire*. Revista Cubana de Ingeniería, 2020. **11**(2): p.38-48.
4. Allam R., *Improved oxygen production technologies*. Energy Procedia, 2009. **1**: p.461-470.
5. Perry, R. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. 9th Edition 2018, Section 13: Distillation Systems. McGraw Hill.
6. Wang B., et al., *Evaluation of mass transfer correlations applying to cryogenic distillation process with non-equilibrium model*. Cryogenics, 2019. **97**: p.22-30.
7. Cheng S., et al., *Thermodynamic evaluation of the novel distillation column of the air separation unit with integration of liquefied natural gas (LNG) regasification*. Energy, 2019. **171**: p.341-359.
8. Leiva C., et al., *Air Separation Units (ASUs) Simulation Using Aspen Hysys at Oxinor I of Air Liquid Chile S.A Plant*. Polish Journal of Chemical Technology, 2020. **22**: p.10-17.
9. Muñoz, M.J., et al., *Aplicación de la simulación de procesos durante la práctica laboral de estudiantes de Ingeniería Química*, Revista Cubana de Ingeniería, 2011. **3**(2): p.15-23.
10. Armengol, A., et al., *Evaluación de alternativas de alimentación en una refinería de petróleo usando un simulador de procesos*. Revista Cubana de Ingeniería, 2014. **5**(2): p.53-60.
11. Scenna N., et al., *Modelado, Optimización y Simulación de procesos químicos*, 1999. ISBN: 950-42-0022-2.
12. Choundari, A., et al., *Selecting the Right Thermodynamic Models for Process Simulation*. Chemical Engineering, 2019. **126**: p.50-55.
13. Jieyu, Z., et al., *Simulation of a novel single-column cryogenic air separation process using LNG cold energy*. Physics Procedia, 2015. **67**: p.116-122.
14. Treybal, R., *Operaciones de Transferencia de masa*. 2^{da} Edición 2018. McGraw Hill.
15. Piloto-Rodríguez, R., et al., *An approach to the use of *Jatropha curcas* byproducts as energy source in agroindustry*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2020. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1749192>

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la dirección, equipo de técnicos y operadores de la planta OxiCuba S.A. que contribuyeron a facilitar la información tecnológica expuesta en este trabajo.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses entre ellos, ni de los autores con el centro donde se realiza el trabajo.

Contribución de los autores

Lázaro Magaña Martel. ORCID: 0000-0002-0151-288X

Participó en el diseño de la investigación, obtención de resultados en el simulador y redacción del manuscrito.

Ofelia Alfonso Alemán. ORCID: 0000-0003-1101-7978

Participó en la búsqueda de la información de referencia y en la obtención de resultados en el simulador.